
SOBRE AS ORIGENS DA RELATIVIDADE ESPECIAL: RELAÇÕES ENTRE QUANTA E RELATIVIDADE EM 1905

Sergio M. Arruda

Departamento de Física - UEL¹

Alberto Villani

Instituto de Física - USP²

Resumo

O presente trabalho trata das origens da Relatividade Especial de Einstein, enfocando as relações e a influência que as suas idéias sobre a natureza da radiação, em particular a hipótese do quantum de luz, exerceram sobre a gênese da teoria. Algumas implicações para o ensino da Relatividade são discutidas.

I. Introdução

A contribuição da História da Ciência ao ensino de ciência tem sido, sobretudo nestes últimos vinte anos, extremamente significativa: o desenvolvimento de currículos, a produção de material didático, inclusive livros-textos, a condução de pesquisas sobre a aprendizagem de ciência, a elaboração de atividades didáticas em sala de aula, a preparação e atualização de professores têm recebido novos impulsos a partir da interação com a área (Matthews, 1994). Em particular, tem sido incrementada a utilização da história da ciência para localizar os obstáculos epistemológicos (Bachelard, 1986) e as tendências do raciocínio espontâneo (Saltiel & Viennot, 1984) que, normalmente perturbam a aprendizagem dos estudantes, e têm sido exploradas as analogias e as sugestões que o desenvolvimento científico (Laudan, 1977) oferece para entender o desenvolvimento de aprendizagem dos estudantes (Villani, 1992; Duschl & Gitomer, 1991).

Quando o conteúdo científico em jogo corresponde a uma das grandes conquistas e rupturas no processo de desenvolvimento científico, as informações sobre os processos de construção e os argumentos que a tornaram plausíveis para os

¹ Parcialmente financiado pela CAPES

² Parcialmente financiado pelo CNPq

inventores parecem importantes, para a melhoria do ensino, facilitando a compreensão e aceitação da nova teoria por parte dos estudantes (Arruda & Villani, 1995).

A gênese da teoria da Relatividade de Einstein e suas relações com a hipótese dos quanta de luz serão o objeto deste trabalho que será concluído com uma reflexão sobre as conseqüências dos resultados da análise histórica para o ensino da Relatividade.

A maioria dos historiadores da ciência tem considerado a gênese da TRE como uma criação inovadora de Einstein e tem realçado a coerência fundamental de seu trabalho. Holton (1960), Goldberg (1969), Hiroshige (1976), Zahar (1973) e outros têm chamado atenção que no artigo “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento” (Einstein, 1905c), o autor propõe uma mudança fundamental em relação à física de sua época, particularmente em relação aos conceitos de tempo e espaço. Parece-nos que a proposta de tal inovação somente foi possível graças à continuidade do programa estatístico-quântico de Einstein e as profundas inter-relações existentes, no pensamento do autor, entre os problemas quânticos e relativísticos.

II. O problema da radiação do corpo negro e o quantum de luz

No final do século XIX, a Física se defrontava com dois problemas cruciais. O primeiro relacionava-se com as experiências sobre a detecção da velocidade absoluta da Terra em relação ao éter, aos quais Lorentz e outros esforçavam-se por dar respostas consistentes sem se afastar demasiadamente dos pressupostos fundamentais da Física Clássica. O segundo dizia respeito ao comportamento da luz no interior de uma cavidade, o chamado problema da radiação do corpo negro, em relação ao qual Planck havia contribuído de maneira decisiva em 1900 (Planck, 1900).

Logo após ter lido os artigos de Planck sobre o corpo negro, ficou claro a Einstein que o fato da emissão e absorção de energia se dar na forma de quanta de magnitude $h\nu$ estava em total contradição com a Mecânica e o Eletromagnetismo. Nas suas Notas Autobiográficas, Einstein coloca que o seu interesse após a leitura do artigo não se relacionava com as conseqüências imediatas dos resultados obtidos por Planck, mas com a seguinte questão: “qual a conclusão geral a que se pode chegar partindo da fórmula da radiação, no que se refere aos fundamentos eletromagnéticos da física?” (Einstein, 1982, p. 50). Na busca por uma resposta consistente a essa pergunta, Einstein foi levado a inventar uma nova teoria para a radiação baseada num modelo corpuscular.

As contribuições de Einstein por volta de 1905 devem ser vistas dentro do seu programa de unificação da Física que caracteriza toda a sua carreira (Klein, 1967). Mas diferente de Lorentz e outros que propunham uma “concentração de esforços em problemas cujas soluções poderiam assegurar uma física unificada baseada somente nas leis e conceitos eletrodinâmicos” (McCormmach, 1970a), para Einstein nem o

Eletromagnetismo nem a Mecânica constituíam uma base segura para uma unificação. Suas dúvidas a respeito da possibilidade da Mecânica oferecer uma base segura vieram da leitura da crítica de Mach a esse programa feita em “The Science of Mechanics” (Mach, 1883), cuja influência Einstein expressaria posteriormente (Einstein, 1982). Nós não vamos tratar desse ponto aqui³. Quanto ao eletromagnetismo, suas conclusões após a leitura dos artigos de Planck o convenceram da inaplicabilidade da teoria para todo o espectro.

Por que, para Einstein, o eletromagnetismo não era uma base suficientemente segura para uma unificação? A resposta para essa questão está no artigo “Sobre um Ponto de Vista Heurístico a respeito da Criação e Conversão da Luz”(Einstein, 1905a), que foi o primeiro de uma seqüência de trabalhos importantes para a Física publicados por Einstein no mesmo ano⁴. Nesse trabalho, ele coloca que apesar da teoria ondulatória ter sido “excelentemente justificada para a representação de fenômenos puramente ópticos”, ou seja, difração, reflexão, refração e dispersão - “é bastante concebível que uma teoria da luz envolvendo o uso de funções contínuas no espaço leve a contradições com a experiência, se aplicada a fenômenos de criação e conversão da luz” (Einstein, 1905a). Essa contradição é explorada por Einstein aplicando a teoria de Maxwell ao problema da radiação do corpo negro, o que permite a ele concluir que “quanto maior for a densidade de energia e maior o comprimento de onda da radiação, mais utilizável é a base teórica [o eletromagnetismo] usada” ... “para pequenos comprimentos de onda e baixa densidade de radiação, entretanto, a base falha completamente” (Einstein, *ibid.*).

Sendo assim, Einstein pergunta em seguida: se o eletromagnetismo não consegue dar conta de fenômenos desse tipo, como nós poderemos entender o comportamento da radiação nesses casos? Sua resposta (Einstein, 1905a):

De fato, parece-me que as observações sobre a radiação do corpo negro, a fotoluminescência e a produção de raios catódicos por luz ultravioleta... podem ser melhor entendidas através da suposição que a energia luminosa seja distribuída descontinuamente pelo espaço. De acordo com a visão considerada aqui... a energia...

³ Sobre a influência de Mach em Einstein ver Holton (1968); Hirose (1976); Paty (1993).

⁴ Os trabalhos de 1905 foram: (a) o artigo sobre o quantum de luz, completado em 17 de março, que levou Einstein a ganhar o prêmio Nobel (Einstein, 1905a); (b) a sua tese de doutoramento sobre uma nova determinação das dimensões moleculares, completada em 30 de abril; (c) o artigo sobre o movimento browniano, recebido em 11 de maio pelo *Annalen* (Einstein, 1905b); (d) o artigo fundamental sobre a relatividade, recebido pelo *Annalen* em 30 de junho (Einstein, 1905c); (e) o segundo artigo sobre a relatividade ($E=mc^2$), recebido em 27 de setembro (Einstein, 1905d); (f) o segundo artigo sobre o movimento browniano, recebido em 19 de dezembro.

consiste de um número finito de quanta, localizados no espaço, que se movem sem serem divididos e que podem ser absorvidos ou emitidos somente por inteiro.

Além disso, cada quanta de energia seria dado por:

$$\varepsilon = \text{const.} \cdot v \quad (1)$$

onde a constante, expressa por Einstein como $\frac{R}{N}b$, é a constante de Planck e onde, R é a constante dos gases, N, o número de Avogadro e b uma constante qualquer. Em seguida, Einstein mostra que a lei de Stokes (mudança na frequência da luz na fotoluminescência) e a ionização de gases por ultravioleta podiam ser consistentemente interpretadas através de sua hipótese. Entretanto, foi sua interpretação da “produção de raios catódicos pela iluminação de sólidos”, ou seja, o chamado *efeito fotoelétrico* e principalmente pela predição da equação:

$$\Pi e = \left(\frac{R}{N}\right)bv - P \quad (2)$$

onde Π é o potencial limite e P a função trabalho, completamente verificada em medições realizadas nos anos subseqüentes por Millikan - a conseqüência experimental mais importante da “ousada, para não dizer imprudente, hipótese de um corpúsculo de luz de energia $h\nu$ ” (Millikan, 1916). Essa afirmação, feita após dez anos de trabalho experimental sobre a equação (2), era uma opinião partilhada pela maioria dos físicos da época. A resistência ao quantum de luz era muito razoável, pois o “ponto de vista heurístico” sugerido por Einstein forçava uma revisão da muito bem estabelecida teoria eletromagnética de Maxwell-Hertz, construída ao longo de praticamente todo o século XIX. Para Einstein, esse foi o argumento decisivo para o abandono da idéia de um éter, como discutiremos na seção IV.

A concepção do quantum de luz e seus desdobramentos foram conclusões fundamentais do programa quântico einsteniano, defendidas por ele praticamente sozinho, até que a comunidade científica, ante as evidências experimentais, teve de aceitá-las por volta de 1924. Einstein jamais se afastou de suas idéias sobre a natureza da luz. A evolução dessas idéias o levaram em 1909 à natureza dual da radiação (Einstein, 1909) e em 1917, à emissão dirigida (Einstein, 1917), trabalhos que o ajudaram a completar a construção do conceito de foton.⁵

⁵ Ver Klein (1964)

III. O problema do movimento relativo ao éter

O problema do movimento relativo ao éter (ou o problema do “vento do éter”) era a outra das duas principais questões que perturbavam a Física no final do século XIX. A preocupação de Einstein com esse problema já vinha desde, pelo menos, meados de 1890 (Hirosgie, 1976; Paty, 1993, pp 68-73), quando ele descobriu o paradoxo da perseguição de um raio de luz, um problema do Eletromagnetismo que lhe ocorreu com a idade de dezesseis anos e que contém em si o germe da Relatividade. O paradoxo é assim enunciado nas Notas Autobiográficas (Einstein, 1959, p. 53):

Se eu persigo um raio de luz com velocidade c (velocidade da luz no vácuo), eu deveria observar esse raio de luz como um campo eletromagnético oscilatório em repouso. Entretanto, parece que não há tal coisa, seja com base na experiência ou de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início pareceu-me intuitivamente claro que, do ponto de vista desse observador, tudo teria de acontecer de acordo com as mesmas leis válidas para um observador que estivesse em repouso em relação à Terra. Pois como poderia o primeiro observador saber, ou seja, ser capaz de determinar que ele está em movimento uniforme rápido?

A questão central levantada pelo paradoxo acima refere-se à possibilidade de determinar absolutamente o movimento por meios eletromagnéticos. Na Mecânica isso não era possível, mas pela teoria eletromagnética entendida como oscilações no éter seria perfeitamente possível a realização desse tipo de experimento.⁶ A relatividade do movimento também levava a certas assimetrias no eletromagnetismo que Einstein conhecia de seus estudos sobre a teoria de Maxwell.

O problema do movimento absoluto no eletromagnetismo aparece na introdução do artigo fundamental sobre a Relatividade (Einstein, 1905c), como uma “assimetria” que a eletrodinâmica de Maxwell conduzia quando aplicada a corpos em movimento, a qual em síntese aponta para a mesma dificuldade dos experimentos de movimento em relação ao éter e do paradoxo, discutidos acima. Tratava-se do seguinte:

Consideramos um ímã e um condutor em movimento relativo. Pela teoria eletromagnética do começo do sec. XX haviam duas possibilidades. Na primeira, o

⁶ Muito desses experimentos foram realizados no final do século XIX e começo do século XX. O mais conhecido, o chamado experimento de Michelson e Morley foi realizado inicialmente por Michelson em 1881, por Michelson e Morley em 1887, por Morley e Miller em 1904 e 1905 e por Miller em 1921. Uma análise extensa desse experimento pode ser encontrada em Miller, D.C., 1933.

condutor está fixo em relação ao éter e o ímã se movimenta com velocidade v para a direita. Portanto um observador em repouso em relação ao condutor descreveria a situação da seguinte maneira. Em cada ponto do espaço o campo magnético \mathbf{B} varia uniformemente com o tempo. Pela lei de Faraday, é criado um campo elétrico \mathbf{E} no espaço ao redor do ímã. Esse campo, através da força de Lorentz $F = q(E + \frac{1}{c}vxB)$ exercerá uma força igual a $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ sobre cada carga do condutor dando origem a uma corrente elétrica. Por outro lado, se o ímã está em repouso em relação ao éter e o condutor se movimenta para a esquerda com a mesma velocidade v , então cada carga q do condutor experimentará uma força eletromagnética dada por $F = \frac{q}{c}vxB$ que produzirá correntes elétricas de intensidade e comportamento iguais às que tinham no primeiro caso as produzidas por forças elétricas. Portanto, no primeiro caso a corrente é produzida por um campo elétrico e no segundo, por um campo magnético.

O problema ou a inconsistência apontada por Einstein devia-se ao fato que, do ponto de vista do experimento, as duas situações são indistinguíveis, isto é, dependem apenas do movimento relativo entre o ímã e o condutor. Entretanto, do ponto de vista teórico, conforme entendido na época, seria perfeitamente possível distinguir entre um e outro caso, já que em princípio poderíamos determinar se é o ímã ou o condutor que está em movimento (absoluto) em relação ao éter.⁷

“Exemplos desse gênero”, continua Einstein, “bem como o insucesso das experiências feitas para constatar o movimento da Terra em relação ao meio luminífero, levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à idéia de um repouso absoluto. Pelo contrário, *em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da Mecânica, também são igualmente válidas as leis ópticas e eletrodinâmicas*, o que, até primeira ordem de aproximação, já está demonstrado” (Einstein, 1905c). A citação em itálico feita acima é o enunciado do Princípio da Relatividade (PR), que Einstein ergue “à categoria de postulado” logo em seguida. Na seqüência ele também introduz o *Princípio da Constância da Velocidade da Luz* (PL), um postulado “só aparentemente incompatível com o primeiro”, com as seguintes palavras: *a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa*. Esses dois

⁷ Um paradoxo bastante interessante que evidencia de maneira ainda mais notável os problemas com as mudanças de referencial no eletromagnetismo é discutido em Sears e Brehme, 1968, cap. 10. Uma discussão detalhada sobre a geração de correntes elétricas por movimentos de condutores ou pela variação do campo magnético é encontrada no texto de Eletromagnetismo do GREF, cap. 3 e Texto Complementar 5 (GREF, 1993).

postulados, continua Einstein, “são suficientes para chegar a uma eletrodinâmica de corpos em movimento, simples e livre de contradições” que se baseia na “teoria de Maxwell para corpos em repouso” e na “cinemática do corpo sólido rígido”. Nessa teoria, “a introdução de éter luminífero revelar-se-á supérflua”, visto que não será necessário introduzir um “espaço em repouso absoluto” (Einstein, *ibid.*).

IV. Origens dos postulados

Aparentemente, se nós nos restringirmos à introdução do artigo relativístico de 1905, a TRE foi inventada para resolver dois problemas da Eletrodinâmica: o primeiro (e aparentemente mais importante) era uma “assimetria” em sua descrição, um problema teórico sutil; o segundo seria o “insucesso” de algumas experiências, como a de Michelson-Morley, o que aliás já estava sendo resolvido por Lorentz, FitzGerald e Poincaré, dentro do programa eletromagnético.⁸ Seriam entretanto essas questões suficientes para causar modificações em conceitos tão profundamente enraizados, como os conceitos newtonianos de tempo e espaço, tendo além disso como conseqüência o abandono da teoria do éter (com todas as implicações que significariam um eletromagnetismo sem um meio propagador)? Para Einstein, decisões tão radicais como essas teriam com certeza o suporte de outras razões suplementares, como será discutido a seguir:

Nas seções anteriores apontamos as duas principais dificuldades que a teoria eletromagnética do final do século XIX/começo do século XX. Por um lado, ela não conseguia dar conta do problema da radiação do corpo negro e dos fenômenos que envolviam absorção ou emissão de radiação pela matéria. Por outro, havia o problema do movimento em relação ao éter, que estava exigindo um número cada vez maior de hipóteses, inclusive *ad hoc*, para explicar a aparente impossibilidade de sua detecção. As duas dificuldades estavam relacionadas com a suposição da existência do éter e com a questão da natureza da luz.

Einstein resolveu a primeira dificuldade com a introdução do quantum de luz. A sua confiança nessa hipótese crescia à medida que a teoria quântica ia se consolidando e na conferência de Salzburgo ele mantém que “o próximo estágio do desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser entendida como uma espécie de fusão entre as teorias ondulatória e de emissão da luz” (Einstein, 1909), cujas razões ele expõe no restante do trabalho. O compromisso entre os modelos corpuscular e ondulatório para a radiação, assumido por Einstein, revela a sua convicção nas duas teorias em suas respectivas regiões de validade, o que ele já

⁸ Nos livros-textos em geral, a criação da relatividade é atribuída a esse último problema. Sobre as abordagens à TRE encontrada em livros-textos ver Dorling (1979) e Arruda (1994).

expressara em 1905. Portanto, com a introdução do quantum de luz, Einstein não via necessidade de substituir completamente a teoria de Maxwell que “havia sido excelentemente justificada para a representação dos fenômenos puramente ópticos” e que provavelmente jamais seria abandonada (Einstein, 1905a).

Acreditamos que, a partir dessa dupla convicção, o pensamento de Einstein teria se desenvolvido da seguinte maneira. Se a radiação é de natureza corpuscular, a luz não é “uma seqüência de estados de um meio hipotético mas, ao contrário, alguma coisa tendo realidade independente, como a matéria”. Em consequência, “hoje nós podemos considerar a hipótese do éter como um ponto de vista obsoleto”, pois, “é inegável que há um extenso grupo de fatos concernentes à radiação que mostram que a luz possui certas propriedades fundamentais que podem ser entendidas mais facilmente do ponto de vista da teoria da emissão de Newton que do ponto de vista da teoria ondulatória”. As citações acima, que se referem ao trabalho de 1909 (Einstein, 1909), apontam que a razão fundamental para o abandono do éter não foi somente o “insucesso” das experiências sobre o movimento em relação ao éter mas teve também origem em outros problemas que a teoria eletromagnética vinha enfrentando que levaram-no a propor a hipótese do quantum de luz, cuja consequência imediata era dar realidade independente à radiação.

Com base no exposto acima as origens dos postulados fundamentais da Relatividade podem ser assim descritas. Para Lorentz o núcleo da teoria de Maxwell era a propagação da ação eletromagnética com velocidade finita e igual a c . Einstein também concordava com essa visão. Para ele, o Postulado da Luz, ou seja, a propagação da luz “com velocidade fixa c com respeito a um sistema de coordenadas K em repouso em relação ao éter, independente do estado de movimento do corpo emissor” e que constituía a “essência da teoria de Lorentz” (Einstein, 1909), era o aspecto fundamental da teoria ondulatória, consequência direta das equações de Maxwell, que deveria ser mantido. Por outro lado, “o experimento de Michelson sugere a suposição que relativamente a um sistema de coordenadas se movendo junto com a Terra e, mais geralmente, relativo a qualquer sistema em movimento não acelerado, todos os fenômenos se processam exatamente de acordo com leis idênticas” (Einstein, *ibid*) que é o enunciado do Princípio da Relatividade. Sendo o éter uma suposição “supérflua”, como requerido pela teoria corpuscular da luz, a principal objeção à elevação do PL e do PR como princípios fundamentais fica excluída.

O elemento que falta para entender a estrutura do artigo relativístico tem raízes epistemológicas. Em busca de uma teoria unificadora Einstein tomou a termodinâmica como protótipo. Ele separava as teorias da Física em dois tipos: as *teorias construtivas*, “que tentam construir uma representação dos fenômenos complexos a partir de algumas proposições relativamente simples” - como a teoria cinética dos gases, por exemplo - e que fazem modelos sobre constituintes

fundamentais; e as *teorias de princípio*, cujo “ponto de partida e fundamento não são constituintes hipotéticos mas propriedades gerais empiricamente observáveis dos fenômenos, princípios dos quais as fórmulas matemáticas são deduzidas tal que elas se aplicam a todo caso que se apresente”, como por exemplo a termodinâmica. “O mérito das teorias construtivas está em seu alcance, adaptabilidade e clareza; o das teorias de princípio em sua perfeição lógica e segurança de seus fundamentos” (citações de Einstein, 1950, p. 54). Tendo a termodinâmica como protótipo de uma teoria de princípio, Einstein então assumiu o Postulado da Relatividade e o Postulado da Luz como seus postulados fundamentais, obtendo a partir deles as demais conseqüências da teoria.⁹

V. Evidências da consistência entre a relatividade especial e a teoria do quantum de luz

Em um trabalho já referido na seção anterior, a conferência proferida em Salzburg em 1909, sob o título “O Desenvolvimento de nossas visões em relação à natureza de constituição da radiação”, cujo principal objetivo era argumentar em favor do que mais tarde veio a ser chamado de a dualidade onda-partícula para a radiação, Einstein menciona dois pontos de contato ou de concordância entre a ainda incipiente Teoria Quântica da Radiação e a TRE. O primeiro diz respeito à existência independente da radiação e ao conseqüente abandono da hipótese do éter, da qual tratamos na seção anterior. O segundo, à transferência de “massa inercial” durante o processo de emissão/absorção de radiação, sintetizada pela fórmula $E = mc^2$. Em relação a esse ponto e ao discutido na seção anterior, a existência independente da luz, Einstein escreve: “com respeito à nossa concepção da estrutura da luz, em particular sobre a distribuição de energia no espaço, a teoria da relatividade não muda nada” (Einstein, 1909).

A expressão $E = mc^2$ foi deduzida por Einstein no segundo artigo sobre a relatividade de 1905 (Einstein, 1905d).¹⁰ Nesse artigo Einstein considera um sistema

⁹ É interessante notar que os dois princípios podem ser formulados como duas impossibilidades: a de detectar o movimento absoluto (PR) e a de medir a velocidade da luz numa direção por sincronização absoluta de relógios (PL).

¹⁰ Alguns historiadores mantêm que Einstein realmente não deduziu essa fórmula no artigo de 1905, visto que sua dedução era cíclica, ou seja, ele usou-a como pressuposto em sua dedução. Isso foi levantado por Ives em 1952 (Ives, 1952), para quem a primeira derivação correta da fórmula foi apresentada por Planck em 1907 e é partilhada por outros historiadores, como Jammer (1964). Mais tarde, essa crítica foi contestada por Stachel e Torreti, os quais argumentando em favor de Einstein aparentemente conseguem demonstrar que as críticas de Ives e Jammer não procedem (Stachel e Torreti, 1982).

em repouso que emite “ondas planas” de mesma energia em sentidos opostos. Usando resultados deduzidos no artigo anterior (1905c) e algumas aproximações, Einstein chega à conclusão que “se um corpo perder uma quantidade de energia L em forma de radiação, a sua massa sofre uma diminuição de L/c^2 ”, o que o leva a concluir em seguida que “a massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético” (Einstein, 1905d). Einstein também deduz a fórmula $E = mc^2$ na conferência de Salzburg, com uma ligeira diferença. Enquanto que em 1905 ele considera a emissão de “ondas planas”, em 1909 ele considera simplesmente a emissão de “radiação” ou “luz”, numa terminologia mais compatível com a teoria emissiva. A fórmula $E = mc^2$ é uma aplicação direta dos postulados fundamentais da TRE à emissão de radiação, um fenômeno que, para Einstein, não podia ser descrito satisfatoriamente pelo eletromagnetismo clássico, como vimos na seção II. Portanto $E = mc^2$ é resultado da primeira aplicação da Relatividade a um processo quântico.

Há uma outra sutil evidência de concordância entre a Relatividade Especial e a Teoria Quântica. Trata-se do seguinte:

Consideramos um observador infinitamente distante de uma fonte luminosa de frequência ν e se movendo relativamente a ela com velocidade v . Einstein demonstrou no artigo 1905c, seção 7, que a frequência ν' das ondas, observadas do referencial do observador, é dada por:

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (3)$$

que é a expressão do “princípio de Doppler para velocidades arbitrárias”, ou seja, a lei de transformação da frequência de uma onda luminosa entre dois sistemas inerciais.

Na seção 8 do mesmo artigo, Einstein faz o mesmo cálculo para a energia de um trem de ondas esférico que se propaga com velocidade c . Ele mostra que a razão entre a energia E' , medida em relação ao sistema móvel e a energia E , medida em relação ao sistema em repouso, é dada por:

$$E' = E \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (4)$$

Comparando (3) e (4) Einstein obtém que:

$$\frac{E'}{v'} = \frac{E}{v} \quad (5)$$

o que indica que a razão entre a energia e a frequência de um trem de ondas é um invariante relativístico.

O resultado acima expressa uma notável consistência entre a Teoria Quântica e a Relatividade, pois a equação (5), que indica que a energia e a frequência da luz variam com o movimento do observador de acordo com a mesma lei, implicitamente dá suporte à equação (1) e à hipótese do quantum de luz, o que foi apontado por McCormach (1970b, p. 64) e discutido mais extensamente por Miller (1976).

VI. Algumas considerações finais

A partir das discussões feitas nas seções anteriores, as quais explicitaram as íntimas relações entre dois dos principais trabalhos de Einstein em 1905, pensamos que a revolução relativística deve ser entendida dentro de um contexto mais amplo, em que não só as idéias de tempo e espaço sofreram modificações, com conseqüências igualmente revolucionárias para outros conceitos da Mecânica, como também as concepções sobre a luz, o éter e a própria teoria eletromagnética foram reinterpretados. Além disso a radical suposição sobre a natureza corpuscular da radiação forneceu parte da base teórica necessária a Einstein para as modificações que o levaram à TRE e às mudanças nos conceitos de espaço e tempo. Por outro lado, os trabalhos de Einstein continuaram a ser estendidos por Planck, na dinâmica relativística, por Minkowski, na teoria do espaço-tempo e posteriormente, novamente por Einstein com a Relatividade Geral. Cada um desses episódios, principalmente os dois últimos, também podem ser vistos como revolucionários, no sentido de terem introduzido modificações significativas, formais e/ou conceituais, nas teorias da época. Podemos entender as contribuições de Einstein em 1905, portanto, como produtos do desenvolvimento de uma investigação que gerou, não apenas mudanças nos conceitos de espaço e tempo, mas uma *seqüência interligada de mudanças* em idéias centrais da Física no final do século XIX, as quais gravitavam principalmente em torno do problema da natureza da radiação e do problema do movimento absoluto no eletromagnetismo. Ou seja, para se compreender melhor a natureza da revolução relativística devemos levar em consideração que estamos tratando com uma estrutura conceitual mais ampla: não estamos mais focalizando apenas uma teoria com contornos bem definidos, mas um programa de pesquisa (ou pelo menos parte dele), isto é, um encadeamento de teorias ou uma *rede conceitual* que compreende conceitos da Teoria da Relatividade e da Teoria Quântica.

A descoberta da profunda integração do pensamento einsteiniano e do seu papel na criação da Teoria da Relatividade nos sugere uma importante reflexão sobre o ensino de Física, que tenta responder aos desafios lançados por vários resultados de pesquisa recentes sobre a aprendizagem da teoria no segundo e no terceiro graus (Posner et al., 1982; Villani & Pacca, 1990; Gil & Solbes, 1993; Arruda, 1994, Arruda & Villani, 1995). Segundo estes autores, embora os estudantes não apresentem inicialmente grandes dificuldades com a compreensão e utilização dos conceitos básicos da Relatividade, demonstram uma grande resistência em relação à plausibilidade de suas conseqüências mais contraintuitivas e de seus postulados, principalmente o da invariância da velocidade da luz, e uma retenção muito limitada de sua aprendizagem.

Pensamos que em boa parte esses problemas ocorram devido à ausência de um esforço conceitual para tornar plausíveis e convincentes os resultados alcançados durante os cursos, com a agravante dos conflitos implícitos ou explícitos com os conceitos espontâneos e newtonianos dos estudantes. Por isso acreditamos que uma primeira contribuição específica da História da Relatividade à melhoria do ensino venha dos principais elementos que deram sustentação à Teoria da Relatividade em 1905:

(a) o eletromagnetismo de Maxwell-Hertz, cuja essência era a propagação da luz com velocidade constante em todas as direções;

(b) os resultados das experiências que questionavam a teoria clássica, como por exemplo: o de Michelson e Morley em 1887, com o interferômetro; de Rayleigh e Brace em 1902 e 1904, sobre a possível dupla refração produzida pelo movimento da Terra; o de Trouton and Noble em 1904, sobre a rotação de um condensador carregado; etc.

(c) as anomalias teóricas, como a assimetria ímã-condutor ou a divergência entre Eletromagnetismo e Mecânica.

(d) a compatibilidade entre a nova teoria da medição proposta pela Relatividade Especial e a filosofia de Mach, que criticava os postulados da Mecânica;

(e) a compatibilidade entre a TRE e a teoria do quantum de luz, considerada por Einstein como bem fundamentada e plausível e, posteriormente desenvolvida no contexto da Mecânica Quântica.

Acreditamos ser possível analisar e discutir na sala de aula todas essas razões, contribuindo de maneira significativa para aumentar a adesão dos estudantes à Teoria da Relatividade e iniciando a construção de um cinturão defensivo de conhecimentos capaz de atrasar o processo de esquecimento e de modificação da aprendizagem adquirida.

Uma segunda sugestão estratégica para a plausibilidade da TRE seria retirá-la do isolamento em que ela é colocada nos livros didáticos e nos currículos. Apesar de concordarmos que ela merece um estudo particular por envolver uma série de idéias altamente contraintuitivas e exigir um tempo de amadurecimento específico,

acreditamos que seus postulados, suas conseqüências e suas conexões tenham que ser reconsiderados explicitamente durante o estudo da teoria eletromagnética, da Mecânica Quântica e da Relatividade Geral.

Concluindo, não está definido, para nós, quais atividades mais específicas e qual roteiro detalhado possam tornar estes objetivos mais facilmente alcançáveis dentro da estrutura do ensino de terceiro grau. Entretanto parece claro que sem esse esforço de relacionar as várias teorias e de discutir explicitamente a plausividade de seus elementos essenciais, a probabilidade que a aprendizagem da TRE decaia rapidamente permanecerá extremamente elevada.

VII. Referências Bibliográficas

- ARRUDA, S.M. (1994). Mudança Conceitual na Teoria da Relatividade Especial. Dissertação de Mestrado. IFUSP & FEUSP.
- ARRUDA, S.M. e VILLANI, A. (1995). Conceptual Change in Special Relativity theory: Contributions of the History of Science. Proceedings of the Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference, 53-61, Minneapolis, EUA.
- BACHELARD, G. (1986). La formation de l'esprit scientifique. 13 ed. Paris, P.U.F.
- DORLING, G. (1979). Approaches to the Teaching of Special Relativity. Em French, 1979. Einstein: A Centenary Volume. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- DUSCHL, R.A. e GITOMER, D.H. (1991). Epistemological Perspective on Conceptual Change: Implications for Educational Practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 1839-858.
- EINSTEIN, A. (1905a). On a Heuristic View Point About the Creation and Conversion of Light. Em Haar, 1967. *The Old Quantum Theory*. Oxford: Pergamon Press.
- EINSTEIN, A. (1905b). On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular kinetic theory of heat. Em Einstein, 1956. *Investigations on the Theory of Brownian Movement*. New York: Dover.
- EINSTEIN, A. (1905c). Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Em Einstein et al, 1983.
- EINSTEIN, A. (1905d). A inércia de um corpo será dependente de seu conteúdo energético? Em Einstein et al, 1983.

- EINSTEIN, A. (1909). L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement. Em Einstein, 1989, cap 5, p. 86-100. Oeuvres Choiesies, vol 1: Mecanique Statistique et Physique Quantique. Textos escolhidos e apresentados por F. Balibar, O. Darrigol e B. Jech. Paris: Seuil.
- EINSTEIN, A. (1917). On the quantum theory of radiation. Em Van der Waarden, Sources of Quantum Mechanics. Amsterdam: North-Holland.
- EINSTEIN, A. (1950). Out of My Later Years. New York: Philos. Library.
- EINSTEIN, A. (1959, 1982). Notas Autobiográficas. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. Autobiographical notes, em Schilpp, 1949. Einstein: Philosopher-Scientist. New York: Harper e Row. Edição de 1959.
- EINSTEIN, A., LORENTZ, H.A. e MINKOWSKI, H. (1983). O Princípio da Relatividade. Lisboa: Fundação Calouste.
- GIL, D. e SOLBES, J. (1993). The introduction of Modern Physics: overcoming a deformed vision of science. Int. J. Sci. Educ., 15(3), 255-260.
- GOLDBERG, S. (1969). The Lorentz theory of electrons and Einstein's theory of relativity. Am. J. Phys., v. 10, 982-994.
- GRAF, 1993. Física 3: Eletromagnetismo. São Paulo, EDUSP.
- HIROSIKE, T. (1976). The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. Hist. Stud. Phys. Sci., v. 7, 3-82.
- HOLTON, G. (1960). On the origins of special theory of relativity. Am. J. Phys. 28(7), 627-636. Também publicado em Holton, 1973.
- HOLTON, G. (1968). Mach, Einstein and the search for reality. Em Holton, 1973.
- HOLTON, G. (1973). Thematic Origins of Scientific Thought. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- IVES, H.E. (1952). Derivation of the mass-energy relation. J. Opt. Soc. Am. 42(8), 540-543.
- JAMMER, M. (1961). Concepts of Mass. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- KLEIN, M.J. (1964). Einstein and the wave-particle duality. The Natural Philosopher, 3, 1-49.
- KLEIN, M.J. (1967). Thermodynamics in Einstein's Thought. Science, 157, p. 509-516.

- LAUDAN, L. (1977). *Progress and its problems*. University of California Press, Berkeley.
- MACH, E. (1883). *Desarrollo Historico-Critico de la Mecanica*. Buenos Aires: Espase-Calpe Argentina S.A. Edição de 1949.
- MATTEWS, M.R. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. Routledge, New York.
- McCORMMACH, R. (1970a). H.A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis*, 61, 458-497.
- McCORMMACH, R. (1970b). Einstein, Lorentz and the Electron Theory. *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 2, 41-87.
- MILLER, D.C. (1933). Ether drift experiments and the determination of the absolute motion of the earth. *Rev. Mod. Phys.* 5, p. 203.
- MILLER, A.I. (1976). On Einstein, light quanta, radiation and relativity in 1905. *Am. J. Phys.* v. 44, 10, 912-923.
- MILLIKAN, R.A. (1916). A Direct Photoelectric Determination of Planck's h . *Phys. Rev.*, 7, p. 355-388.
- NUGAEV, R.N. (1988). Special Relativity as a Stage in the Development of Quantum Theory. *Historia Scientiarum*, 34, p. 57-79.
- PATY, M. (1993). *Einstein Philosophe*. Paris: Presses Universitaires de France.
- PLANCK, M. (out e dez 1900). On a Improvement of Wien's Equation for the Spectrum. On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum. Em Kangro, 1972. *Planck's Original Papers in Quantum Physics*. London: Taylor & Francis.
- POSNER, G.J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. e GERTZOG, W.A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Sci. Educ.* 66(2): 211-227.
- SALTIEL, E. e VIENNOT, L. (1984). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students?. In Lijnse, P. (Ed.), *The many faces of teaching and learning mechanics*. G.I.R.E.P. Conference on Physics Education, Utrecht, pp. 189-214.
- SEARS e BREHME (1968). *Introduction to the Theory of Relativity*. Reading, Mass: Addison-Wesley Publis. Co.

VILLANI, A. e PACCA, J.L.A. (1990). Spontaneous reasoning of graduate students. *Int. J. Sci. Educ.*, 12(5), 589-600.

VILLANI, A. (1992). Conceptual Change in Science and Science Education. *Science Education*, 76(2), 223-237.

ZAHAR, E. (1973). Why did Einstein's programme supersede Lorentz's? *Brit. J. Phil. Sci.* 24(1), 95-123.